

早稲田大学大学院 理工学研究科

博士論文審査報告書

論 文 題 目

LPG-SI エンジンの燃焼特性の把握に基づく
高効率化に関する研究

A Study on High Efficiency of an LPG-SI Engine
Based on Understanding of Its Combustion Characteristics

申 請 者

水 嶋	教 文
Norifumi	Mizushima

--

2010 年 3 月

液化石油ガス(LPG: Liquefied Petroleum Gas)は同一発熱量燃焼時の二酸化炭素排出量がガソリンと比較して 10 ~ 12% 低く、オクタン価が高いことから火花点火(SI: Spark Ignition)エンジンの高効率運転に適している。このため、SI エンジンの燃料として主流であるガソリンの代替として LPG を使用することは、地球温暖化対策およびエネルギーセキュリティの観点から有効な手段といえる。しかしながら、LPG-SI エンジンに関しては、エンジン性能試験を主体として応用研究は数多く見られるものの、その燃焼特性に基づいた体系的なエンジン性能向上技術に関する報告例はなく、LPG の有するポテンシャルを最大限に活かしたエンジン燃焼制御がなされていないのが現状である。

そこで本論文では、排気量 1997cm³、直列 4 気筒 MPI 式ガソリンエンジンの燃料供給系のみを LPG 液体噴射システムに変更した LPG-SI エンジンに対して、耐ノック性、燃焼速度、および排出ガス特性といった燃焼特性をレギュラーガソリン(以下、Gasoline)運転時と比較することで明らかにするとともに、その燃焼特性を活かした高効率化手法を得ることを目的としている。さらに、定容燃焼器による火炎伝播実験および詳細な素反応過程を考慮した 1 次元予混合火炎シミュレーションを実施することで、組成の異なる各種 LPG に対して火炎伝播特性を化学反応速度論的に解析し、LPG-SI エンジンの高効率化に適した LPG の燃料組成に関する指針を得ることも目的としている。

本論文は 8 章から構成されている。

第 1 章では、本研究の背景として LPG 自動車の現状および問題点について述べている。また、LPG 自動車の燃料供給システム、および日本国内における LPG の燃料組成についての概説している。さらに、従来の研究およびその問題点について述べ、本研究の目的および方法を示している。

第 2 章では、エンジン実験装置、定容燃焼実験装置および実験方法について説明し、実験と併せて実施した数値シミュレーションによる解析手法について述べている。

第 3 章では、エンジン実験にて LPG の耐ノック性、燃焼速度および排出ガス特性を Gasoline と比較することで把握している。耐ノック性については Gasoline に対して優れ、特に C₃H₈ の質量含有率が約 100% の LPG100P では、ベースエンジンで適用されている圧縮比 10 において、エンジンに深刻な損傷を与えるノッキングが発生しないことを明らかにしている。また、C₃H₈ の質量含有率が約 20% の LPG20P では、LPG100P と比較してノック余裕度は小さいが、同条件で MBT 近傍での運転が可能となることを確認している。さらに燃焼速度はガソリンと比較して速く、その効果は LPG100P の方が LPG20P よりも大きいことを示している。排出ガス特性については、LPG の優れた気化特性により THC 排出量を、そして、LPG の高 H/C 比がもたらす燃焼温度低下の効果により NO_x 排出量を Gasoline に対して低減できることを明らかにしている。

第 4 章では、第 3 章で確認された燃焼速度向上要因を詳細に把握するため、LPG の主成分である C₃H₈、*n*-C₄H₁₀、および *i*-C₄H₁₀ と Gasoline に対して、定

容燃焼器を用いた層流燃焼速度の計測および1次元予混合火炎シミュレーションによるこれらの燃焼機構の解析を実施し、さらに、層流燃焼速度の差異がSIエンジンの燃焼速度に及ぼす影響を調査している。この結果、理論空燃比でのGasoline火炎においては、化学反応速度論的に C_3H_8 および $n-C_4H_{10}$ 火炎と比較して H_2 濃度が低くなることを見出している。

これにより、 C_3H_8 および $n-C_4H_{10}$ 火炎ではGasoline火炎と比較して $H_2+O \rightarrow H+OH$ の素反応が活発化し、 H 、 OH ラジカル、そして、連鎖分岐反応により続いて生成される O ラジカル等の活性基が増大することを示している。このため、その他の連鎖反応が活発化し、 C_3H_8 および $n-C_4H_{10}$ では燃焼速度が速くなることを明確にする一方、 $i-C_4H_{10}$ においてはその分子の構造上、連鎖反応を活発化させる C_2 系ラジカルの生成に繋がる C_2H_4 の生成経路が少ないため、 C_3H_8 および $n-C_4H_{10}$ と比較して燃焼速度が遅くなることを示している。また、2成分および3成分が混合したLPGの燃焼速度は、各成分単一での燃焼速度がその質量分率に応じて比例的に変化することを実験的に確認している。さらに、これらの燃焼速度の差異は、SIエンジンの低速域における燃焼速度に同等の差異を生じさせることを明らかにしている。

第5章では、第3章で確認されたLPGの耐ノック性を活かしたエンジンの高負荷運転における高効率化について述べている。通常、ガソリンエンジンでは高負荷運転領域において出力・トルク性能の向上を最重視しているため、空燃比のリッチ化(エンリッチ制御)により耐ノック性および体積効率の向上を図っている。これは同時に、触媒の熱劣化抑制のための排気温度の低下も可能となるが、熱効率が悪化する。一方で、LPG-SIエンジンの高負荷運転においては、優れた耐ノック性を活かすことでGasoline運転に対して点火時期を進角することができ、MBT近傍での運転が可能となることを示している。これにより、トルク性能の向上および排気温度の低下が可能となるため、過度なエンリッチ制御を抑制することができることを見出している。この結果、LPG運転ではGasoline運転に対して高効率化、および CO 、 THC 排出量の同時改善が可能であることを明らかにしている。

第6章では、実用条件下である低速低負荷運転領域において高効率化と低 NO_x 化を狙い、第3章および第4章で確認されたLPGの高燃焼速度の特性を活かして、EGR限界の拡大を図った結果、LPG運転ではEGRガス導入時においても第3章の結果と同様に燃焼速度が向上するため、燃焼安定性が改善し、Gasoline運転に対して3~5%のEGR限界の拡大を実現できることを示している。これにより、EGRによる5~6%のBSEC改善効果を維持しつつ、 NO_x 排出量は、LPGの高 H/C 比がもたらす燃焼温度低下の効果と併せて、Gasoline運転に対して約半減できることを見出している。

第7章では、低速低負荷運転領域において更なる高効率化を達成するため、エンジンの高圧縮比化による熱効率の向上を図っている。通常のSIエンジンにおいてはノッキングが制約となり、圧縮比を高めることが困難であるが、

LPG は耐ノック性に優れているため、SI エンジンとしては極めて高い圧縮比が選定可能となり、この結果、LPG20P に対しては CR12 まで圧縮比を向上することで、ベースエンジンに対するトルク性能の向上、排出ガス性能の維持、および部分負荷熱効率の向上が可能となり、部分負荷において図示熱効率が約 7% 改善することを示している。また、LPG100P に対しては CR13 まで圧縮比を上げることで、ベースエンジンに対するトルク性能の向上、排出ガス性能の維持しながら部分負荷、全負荷ともに熱効率が向上し得る可能性を示している。特に、図示熱効率に関しては部分負荷で約 7%、全負荷で約 6 ~ 7% 改善することを確認している。さらに、本研究で使用した試作ピストンに対して燃焼室設計を見直すことで、冷却損失および未燃燃料排出の抑制による更なる高効率化が期待できることを述べている。

第 8 では第 7 章までの成果及び今後の研究の発展性について言及している。

以上を要するに、本論文は LPG を SI エンジンに使用するにあたり、工業熱学および化学反応速度論に基づく理論解析を実施し燃料の持つポテンシャルを最大限に引き出すことで、ベースのガソリンエンジンに対し、耐ノック性、燃焼速度、および排出ガス特性を改善した液体噴射 LPG-SI エンジンの開発に成功している。このような手法は、SI エンジンはもとより CI エンジンも含めた幅広いパワーソースの研究開発にも応用することが可能であり、今後の乗用車用代替燃料エンジンの高効率・低公害化に関わる技術開発に大きく貢献するものとして高く評価される。よって、博士（工学）の学位論文として価値あるものと認めるものである。

2010 年 3 月

審査委員 主査	早稲田大学教授 博士（工学）早稲田大学	草鹿 仁
	早稲田大学教授	永田勝也
	早稲田大学教授	大聖泰弘
	早稲田大学教授 工学博士（早稲田大学）	勝田正文
	早稲田大学准教授 博士（工学）早稲田大学	中垣隆雄